

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.378.82

В.А. Бажилов, Е.А. Михалицын

ТОЧНАЯ ЮСТИРОВКА ФИКСИРОВАННЫХ АТТЕНУАТОРОВ С МАЛЫМ УРОВНЕМ ОСЛАБЛЕНИЯ

ФНПЦ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

Проведено исследование влияния лазерной подгонки на характеристики СВЧ аттенуаторов с малым уровнем ослабления построенных на основе неоднородных распределенных резистивных структур.

Ключевые слова: фиксированные аттенуаторы, резистивные пленки, лазерная подгонка.

Введение

Фиксированные аттенуаторы в микрополосковом тонкопленочном исполнении находят широкое применение в трактах приемопередающей РЭА СВЧ и используются для калиброванного ослабления мощности, развязки взаимовлияющих функциональных узлов, согласования импедансов в межкаскадных СВЧ цепях. В литературе подробно рассмотрены вопросы расчета и проектирования тонкопленочных микрополосковых аттенуаторов среднего и высокого уровня ослабления [1-3], тогда как аттенуаторы с малым ослаблением (0,5–4 дБ) в силу ряда их особенностей исследованы не в полной мере.

Известно, что лазерная подгонка резистивных структур аттенуатора позволяет смягчить конструктивно-технологические требования к формированию топологии и самому процессу изготовления. Вместе с тем, анализ влияния лазерной подгонки резистивных пленок на частотные характеристики и тепловые режимы работы устройства в литературе практически отсутствует. А компромиссное соотношение технологических возможностей производства и требований к техническим характеристикам аттенуатора позволит увеличить выход годной готовой продукции и снизить её стоимость. В данной работе проводится численное исследование влияния величины реза неоднородной резистивной структуры на частотные свойства фиксированных аттенуаторов малого уровня ослабления. При этом очень важным аспектом расчета является его нацеленность на практическое применение в инженерной и технологической практике.

Конструктивная и расчетная модели

Рассмотрим низкодецибелный аттенуатор, конструктивно представляющий собой диэлектрическую пластину, на верхнюю сторону которой нанесены две тонкие (меньше толщины скин-слоя) резистивные пленки, а также проводящие центральные и заземляющий контакты (рис.1). Между входным и выходным центральными контактами напыляется резистивная пленка с малой величиной поверхностного сопротивления $\rho_1=5 - 25 \text{ Ом}/\square$. Пленка с более высоким значением поверхностного сопротивления $\rho_2=100 - 1000 \text{ Ом}/\square$ примыкает к низкоомной и соединяется с заземляющим контактом. Заземление осуществляется косвенным образом с помощью перемычки.

Представленная конструктивная модель аттенюатора на основе неоднородной тонкопленочной резистивной структуры позволяет получать номиналы коэффициента ослабления A от 0,5 до 4 дБ. Отклонение величины ослабления от номинального значения на постоянном токе обозначим ΔA , неравномерность ослабления в полосе рабочих частот - α . Точная юстировка величины ослабления на постоянном токе обеспечивается лазерной подгонкой по низко- и высокоомной резистивным пленкам (рис. 1). Частотная равномерность ослабления зависит от геометрических размеров неоднородной резистивной структуры, а также от величины лазерных резов. Симметричность лазерных резов относительно оси симметрии резистивной структуры обеспечивает симметричность частотных характеристик плеч аттенюатора.

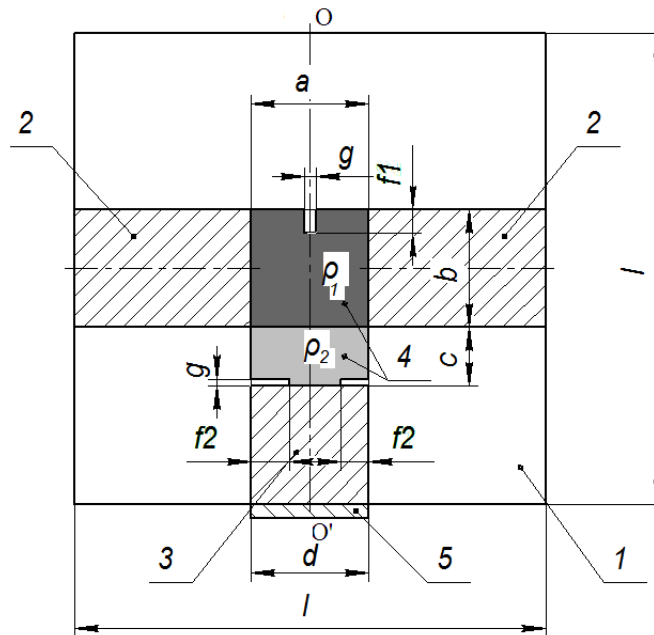


Рис. 1. Эскиз топологии платы аттенюатора:

1 – диэлектрическая подложка; 2 – входной и выходной контакты; 3 – заземляющий контакт; 4 – резистивные пленки, $\rho_2 > \rho_1$; 5 – заземляющая перемычка

Эквивалентная схема замещения аттенюатора на постоянном токе представляет собой П-образное соединение трех сопротивлений: последовательного R_1 и двух сопротивлений на землю R_2 [1]. Параметры подобной схемы поддаются строгому инженерному расчету методом симметрично-ассиметричного возбуждения [4]. Величина ослабления A (дБ) и нормируемое к волновому сопротивлению подводящей линии Z_{ax} входное сопротивление устройства r находятся по формулам:

$$A = 20 \lg \left[\left(1 + \frac{1}{r_2} \right) \left(1 + \frac{r_1}{2} + \frac{r_1}{2r_2} \right) \right]; \quad r = \left(\frac{1}{r_2} + \frac{r_2 + 1}{r_1 r_2 + r_2 + r_1} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где r_1, r_2 - нормируемые к Z_{ax} сопротивления R_1 и R_2 .

В связи с этим поставленная задача создания аттенюатора с уровнем ослабления на постоянном токе $A \pm \Delta A$ сводится к определению размеров, поверхностных сопротивлений пленок аттенюатора, обеспечивающих требуемые значения сопротивлений R_1 и R_2 , а также допустимых отклонений указанных величин с учетом лазерной подгонки.

Расчет сопротивлений R_1 и R_2 проведем аналитически. Для этого рассечем исходную распределенную резистивную структуру вдоль оси симметрии OO' . Рассчитав сопротивления этой структуры с контактами, расположенными так, как показано на рис. 2, а, найдем

$1/2R_1$. Рассчитав контактное сопротивление структуры рис. 2, б, получим величину сопротивления R_2 .

Для этого запишем для первой структуры (рис. 2, а) в областях:

$$I(x \in [0, a/2], y \in [0, f_1],$$

$$II(x \in [0, a/2], y \in [f_1, b],$$

$$III(x \in [0, a/2], y \in [b, b+c],$$

и для второй структуры (рис. 2, б) в областях:

$$I(x \in [0, a/2], y \in [0, b],$$

$$II(x \in [0, f_2], y \in [b, b+c],$$

$$III(x \in [f_2, a/2], y \in [b, b+c],$$

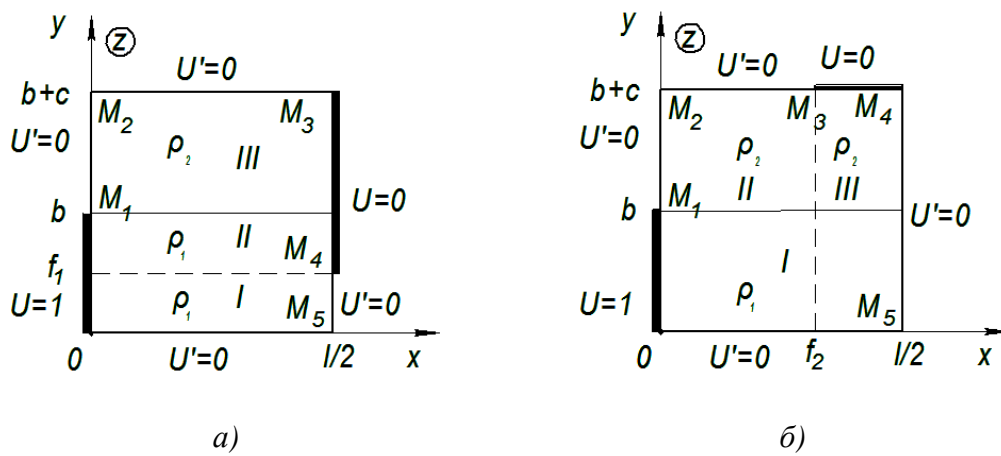


Рис. 2. Распределенные резистивные структуры

уравнения Лапласа

$$\frac{d^2U_i}{dx^2} + \frac{d^2U_i}{dy^2} = 0 \quad (i = I, II, III) \tag{2}$$

при краевых условиях для первой структуры

$$U_I(0, y) = U_{II}(0, y) = U_1, \quad U_{II}(a/2, y) = U_{III}(a/2, y) = U_2,$$

$$\left. \frac{\partial U_I}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_I}{\partial x} \right|_{x=a/2} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{III}}{\partial y} \right|_{y=b+c} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{III}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \tag{3a}$$

и для второй

$$U_I(0, y) = U_1, \quad U_{II}(a/2, y) = U_{III}(a/2, y) = U_2,$$

$$\left. \frac{\partial U_I}{\partial x} \right|_{x=a/2} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_I}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{II}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{II}}{\partial y} \right|_{y=b+c} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{III}}{\partial x} \right|_{x=a/2} = 0. \tag{3б}$$

При условиях сопряжения для первой структуры

$$U_I(x, f_1) = U_{II}(x, f_1), \quad U_I(x, b) = U_{II}(x, b),$$

$$\left. \frac{\partial U_I}{\partial y} \right|_{x=f_1} = \left. \frac{\partial U_{II}}{\partial y} \right|_{y=f_1}, \quad \left. \frac{\partial U_{II}}{\partial y} \right|_{y=b} = \Omega \left. \frac{\partial U_{III}}{\partial y} \right|_{y=b}, \tag{4a}$$

и для второй резистивной структуры

$$U_I(x, b) = U_{II}(x, b), \quad U_{II}(f_2, y) = U_{III}(f_2, y),$$

$$\left. \frac{\partial U_I}{\partial y} \right|_{y=b} = \Omega \left. \frac{\partial U_{II}}{\partial y} \right|_{y=b}, \quad \left. \frac{\partial U_{II}}{\partial x} \right|_{x=f_2} = \left. \frac{\partial U_{III}}{\partial x} \right|_{x=f_2}, \quad \left. \frac{\partial U_I}{\partial y} \right|_{y=b} = \Omega \left. \frac{\partial U_{III}}{\partial y} \right|_{y=b}, \quad (46)$$

где $U_i(x, y)$ - поле потенциалов в резистивной структуре; $\Omega = \rho_1 / \rho_2$ - параметр, характеризующий степень неоднородности резистивной структуры.

Поставленные краевые задачи (2)-(4) решаем методом разделения переменных. Для поля потенциалов в областях I-III первой структуры (рис. 2, а) получаем:

$$U_I = 1 + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sin(\alpha_n x) \text{ch}(\alpha_n y),$$

$$U_{II} = \frac{a/2 - x}{a/2} + \sum_{n=0}^{\infty} B_n \sin(\beta_n x) \{ \text{ch}[\beta_n (y - f_1)] + \text{ch}[\beta_n (b - y)] \},$$

$$U_{III} = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin[\alpha_n (a/2 - x)] \text{ch}[\alpha_n (b + c - y)], \quad (5a)$$

и второй резистивной структуры:

$$U_I = 1 + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sin(\alpha_n x) \text{ch}(\alpha_n y),$$

$$U_{II} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos[\beta_n x] \text{ch}[\beta_n (b + c - y)],$$

$$U_{III} = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos[\beta_n x] \text{sh}[\beta_n (b + c - y)], \quad (56)$$

где $\alpha_n = \frac{\pi(2n+1)}{a}, \beta_n = \frac{2\pi n}{a}$.

Подставляя выражения для полей потенциалов (5) в условия сопряжения (4), получаем систему линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов A_n, B_n, C_n . Выражая B_n, C_n через коэффициенты A_n , приходим к следующей бесконечной системе уравнений относительно коэффициентов $A'_n = A_n (-1)^n \text{sh}(\alpha_n a/2)$ для первой структуры

$$\sum_{k,n=0}^{\infty} \frac{A'_n}{(\alpha_n / \beta_k)^2 - 1} \left\{ \text{cth}(\alpha_n f_1) + \frac{\alpha_n}{\beta_k} \frac{1 + \text{ch}[\beta_k (b - f_1)]}{\text{sh}[\beta_k (b - f_1)]} \right\} = 1, \quad (6a)$$

и для второй резистивной структуры

$$\sum_{k,n=0}^{\infty} A'_n I_{nk} \left\{ \text{cth}(\alpha_n f_1) + \frac{1}{\Omega} \frac{\alpha_n}{\beta_k} \text{cth}[\beta_k (b + c - f_1)] \right\} = I_k, \quad (66)$$

где $I_{nk} = \frac{a}{2\pi} \left\{ \frac{\cos \left[\frac{\pi f_2}{a} (2(n+k)+1) \right]}{2(n+k)+1} + \frac{\cos \left[\frac{\pi f_2}{a} (2(n-k)+1) \right]}{2(n-k)+1} \right\} - \frac{a}{2\pi} \left\{ \frac{1}{2(n+k)+1} + \frac{1}{2(n-k)+1} \right\},$

$$I_k = \frac{1}{\beta_k} \sin \frac{2\pi k f_2}{a}.$$

Решая полученные системы линейных уравнений (6) методом редукции, находим коэффициенты A_n . Сопротивление рассматриваемых структур находится исходя из величины тока, протекающего через поперечное сечение резистивного слоя вблизи контакта OM_1 , по формулам:

$$R_1 = 2 / \left[\frac{1}{\rho_1} \sum_{n=0}^{\infty} A'_n \right], \quad R_2 = \rho_1 / \left[\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ A'_n + 2B_n \operatorname{sh}[\beta_n(b-f_1)] - 2 \frac{b-f_1}{a} \right\} \right]. \quad (7)$$

Сравнение результатов расчета контактного сопротивления при $\Omega = 1$ и $\Omega = 0$ ($\rho_2 \gg \rho_1$) с результатами, полученными для однородных резистивной структуры методом конформных отображений [1], показало расхождение не более 0,15%. На рис. 3 приведены графики зависимости сопротивления R_1 от параметра неоднородности резистивной структуры (рис. 3, а), от коэффициента формы высокоомного резистора (рис. 3, б), от относительной величины лазерного реза низкоомной пленки (рис. 3, в), а также сопротивления R_2 от относительной величины лазерной подрезки высокоомной резистивной пленки вблизи заземляющего контакта (рис. 3, г).

Поскольку провести непосредственное измерение значений сопротивлений R_1 и R_2 вследствие особенностей топологии аттенюатора практически невозможно, для оценки реализуемой величины ослабления и её точной юстировки предлагается измерять в процессе лазерной подгонки сопротивлений R'_1 и R'_2 , которые связаны с R_1 и R_2 соотношениями:

$$R'_1 = \frac{R_1 R_2}{R_1 / 2 + R_2}; \quad R'_2 = \frac{R_2}{2}. \quad (8)$$

Схемы измерения указанных сопротивлений представлены на рис.4. Поскольку введение прорези по низкоомной резистивной пленке изменяет только R_1 , а подрезка высокоомной резистивной пленки изменяет оба сопротивления [5], то сначала следует проводить лазерную подгонку по высокоомной резистивной пленке (рис. 4, а), затем - по низкоомной (рис. 4, б).

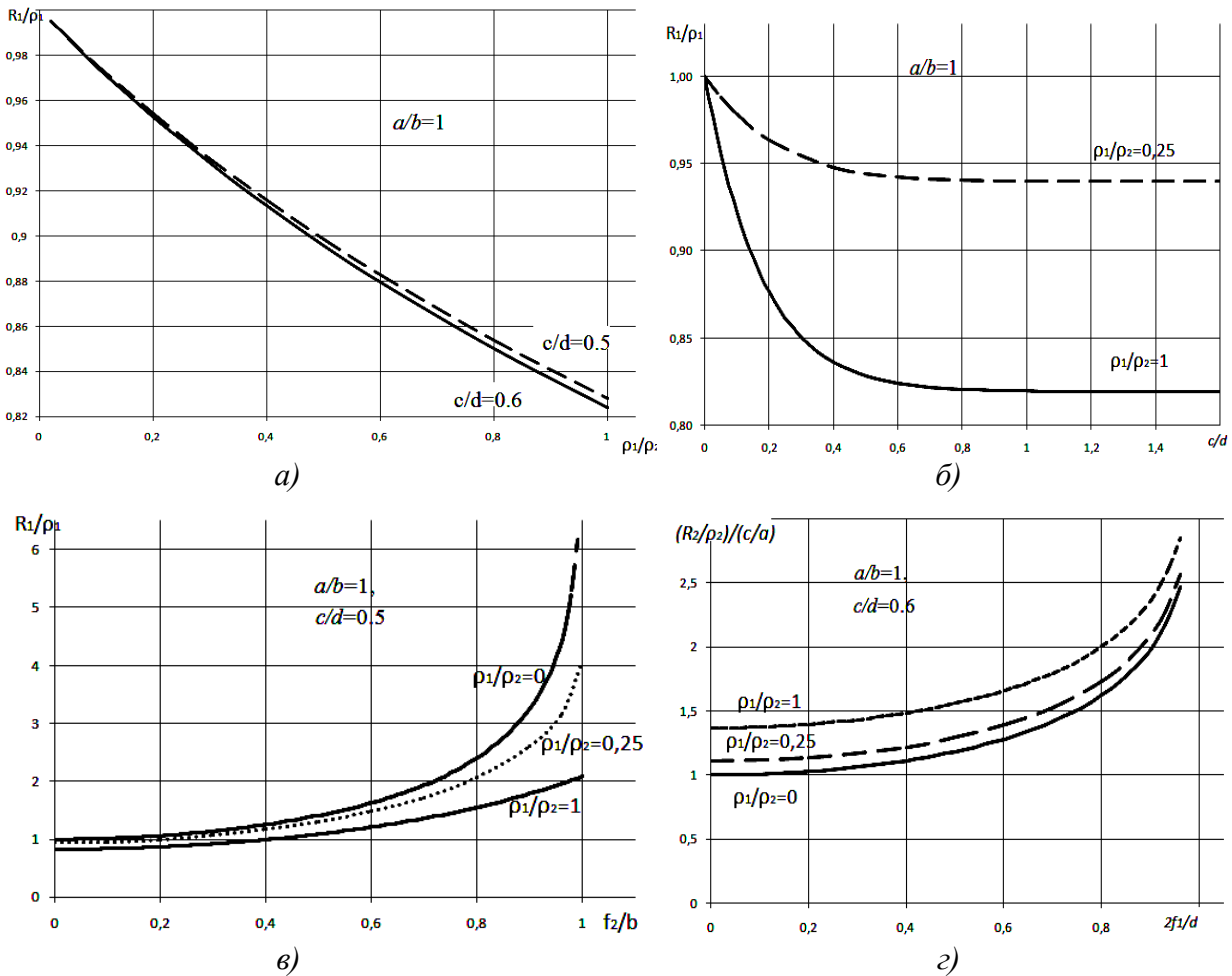


Рис. 3. Результаты расчета сопротивлений

Выражая из (8) R_1 и R_2 через R'_1 и R'_2 и подставляя в (1), получаем:

$$A = 20 \lg \left[\left(1 + \frac{Z_{ex}}{2R'_2} \right) \left(1 + \frac{2R'_2 R'_1}{Z_{ex}(4R'_2 - R'_1)} + \frac{2R'_2}{4R'_2 - R'_1} \right) \right];$$

$$r = \left(\frac{Z_{ex}}{2R'_2} + \frac{R'_2 + Z_{ex}/2}{\frac{4R'_1 R'^2_2}{Z_{ex}(4R'_2 - R'_1)} + R'_2 + \frac{2R'_1 R'_2}{(4R'_2 - R'_1)}} \right)^{-1}, \quad (9)$$

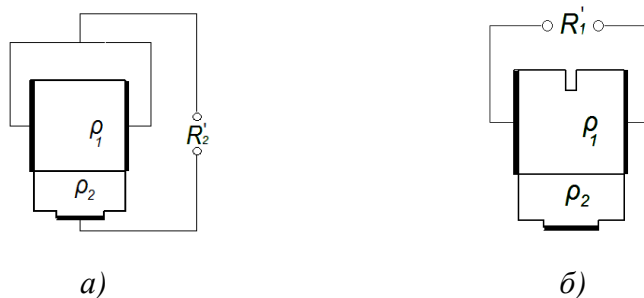


Рис. 4. Схемы технологического контроля

В табл. 1 приведены результаты расчета сопротивлений R_1 и R_2 , а также R'_1 и R'_2 , обеспечивающих заданную величину ослабления. Анализ чувствительности величины ослабления низкодецибелльных аттенуаторов S_1 и S_2 к изменению сопротивлений R'_1 и R'_2 показал, что относительный вклад в величину ΔA погрешности лазерной подгонки R'_1 и R'_2 по модулю приблизительно одинаков и составляет 0,5%. При этом знаки указанных чувствительностей противоположны, поэтому равные относительные отклонения величин сопротивлений не будут приводить к существенному отклонению величины ΔA от нулевого значения. Очевидно, что согласование устройства при этом несколько ухудшится.

Таблица 1

Сопротивления и чувствительности величины ослабления

A, дБ	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R'_1 , Ом	R'_2 , Ом	S_1	S_2
1	5,77	869,6	5,75	434,8	0.493	-0.500
2	11,61	436,2	11,46	218,1	0.488	-0.499
3	17,61	292,4	17,10	146,2	0.479	-0.498
4	23,85	110,5	22,63	110,5	0.473	-0.495

Используя предложенную математическую модель, можно с учетом технологического допуска на размеры резистивной структуры сформировать требования к минимальной величине поверхностных сопротивлений пленок. Нижняя граница отклонений поверхностных сопротивлений определяется исходя из максимальной величины лазерного реза. Последняя зависит от требований к частотным характеристикам и тепловым режимам работы аттенуатора.

Частотные характеристики

Эквивалентная схема СВЧ платы аттенуатора с подводящими линиями представлена на рис. 5. Паразитная емкость на землю C_3 определяется габаритными размерами резистивной структуры и величиной лазерного реза по высокоомной пленке f_2 . Величина последовательной паразитной индуктивности резистивной структуры L_2 зависит от длины a резистивной пленки и величины лазерного реза f_1 . Эквивалентом центральных контактов выступает

ФНЧ, образованный индуктивностью $L1$ и емкостями $C1$ и $C2$. Емкость $C4$ представляет собой краевую емкость между торцами центральных контактов. Паразитная индуктивность $L3$ задается заземляющей перемычкой.

В ходе численного моделирования сеточными методами было установлено, что на частотные характеристики низкодцецибельных аттенуаторов наибольшее влияние оказывает паразитная емкость на землю $C3$ (рис. 5). Чем больше эта емкость, тем быстрее с ростом частоты увеличивается затухание. Подрезка контакта высокоомной пленки приводит к возникновению дополнительной эквивалентной емкости параллельного шлейфа, представляющего собой отрезок линии из резистивного материала. С ростом частоты эквивалентная емкость увеличивается, что приводит к существенному сужению полосы рабочих частот аттенуатора.

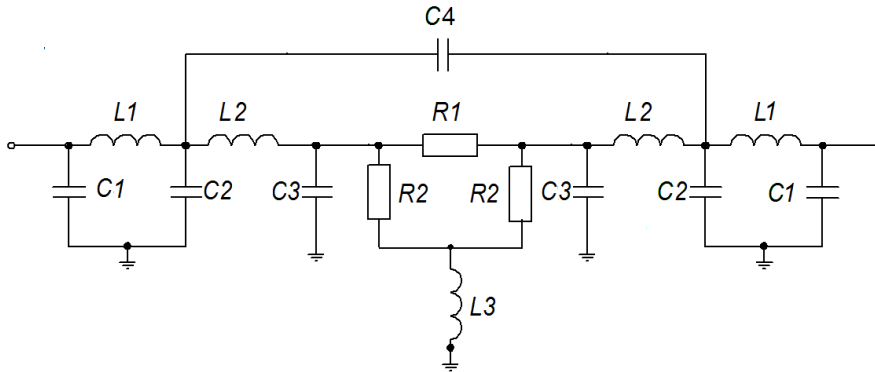


Рис. 5. Эквивалентная схема аттенуатора

Лазерная подгонка низкоомной резистивной пленки приводит к увеличению индуктивности $L2$ (рис. 5), что также снижает верхнюю рабочую частоту устройства.

На рис. 6 представлены графики частотной зависимости величины ослабления для одноступенчатых аттенуаторов с различными вариантами юстировки резистивных пленок. Из графиков видно, что подрезка высокоомной резистивной пленки практически в два раза снижает верхнюю рабочую частоту, в отличие от лазерной подгонки низкоомной резистивной пленки, при одинаковых значениях относительных величин лазерного реза.

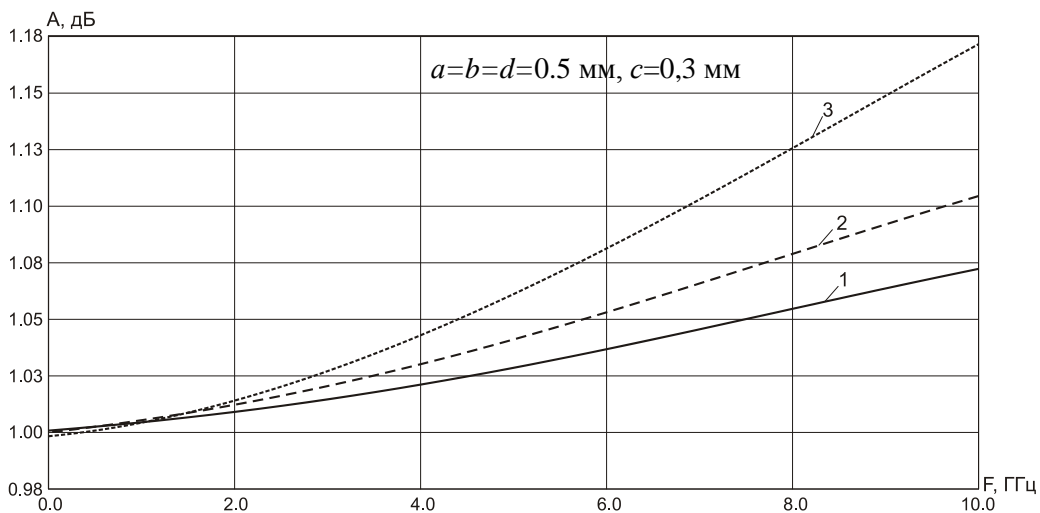


Рис. 6. Частотная зависимость ослабления аттенуатора с параметрами:

- 1 – без лазерной подгонки: $\rho_1=5.8 \text{ Ом}/\square$, $\rho_2=720 \text{ Ом}/\square$;
- 2 – с лазерной подгонкой по низкоомной пленке: $\rho_1=3.8 \text{ Ом}/\square$, $\rho_2=720 \text{ Ом}/\square$, $f_2 = b/2$;
- 3 – с подгонкой по высокоомной резистивной пленке: $\rho_1=5,8 \text{ Ом}/\square$, $\rho_2=400 \text{ Ом}/\square$, $f_1 = 0.35d$

Неравномерность ослабления α и КСВн в частотной полосе 10 ГГц для разработанных

низкодецибелных аттенуаторов приведены в табл. 2. Минимальная неравномерность ослабления α_{\min} достигается при отсутствии лазерной подгонки, т. е. при максимальных значениях поверхностных проводимостей резистивных пленок. КСВн и α_{\max} соответствуют случаю максимальной величины лазерного реза. При этом погрешность величины ослабления на нулевой частоте составляла 0,01 дБ от номинального значения.

Таблица 2

Характеристики низкодецибелных аттенуаторов

A, дБ	ρ_1 , Ом/□	ρ_2 , Ом/□	α_{\min}	α_{\max}	КСВн
1	3,5 – 5,5	370 – 720	0,08	0,2	1,3
2	9 – 11	190 – 370	0,10	0,3	1,4
4	19 – 22,5	90 – 190	0,15	0,4	1,5

Заключение

Таким образом, в результате исследований было выяснено, что при одинаковых размерах лазерных резов по низкоомной и высокоомной резистивным пленкам большей величиной частотной неравномерности ослабления и худшим КСВн характеризуются аттенуаторы с большим номиналом ослабления. Кроме того, подрезка высокоомной резистивной пленки вблизи заземляющего контакта существенно влияет на частотные характеристики аттенуатора, тогда как лазерная подгонка низкоомной резистивной пленки оказывает меньшее влияние.

Библиографический список

1. Садков, В.Д. Расчет тонкопленочной аттенуаторной пластины / В.Д. Садков, Ю.А. Горячев // Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника. 1977. Вып. 2. С. 13–19.
2. Моругин, С.Л. Анализ теплового режима и частотных характеристик тонкопленочных аттенуаторов ВЧ- и СВЧ-диапазонов / С.Л. Моругин, В.Д. Садков, В.Н. Уткин // Радиофизика. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2007. № 6. С. 34–39.
3. Анализ и моделирование сверхширокополосных фиксированных аттенуаторов СВЧ-диапазона / Г.Г. Гошин [и др.] // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2 (24). Ч. 1.
4. Чижов, А.И. Метод определения элементов матрицы рассеяния СВЧ – четырёхполюсников // Антенны. 2007. Вып. 2 (117). С. 55–59.
5. Садков, В.Д. Расчет и юстировка тонкопленочных звеньев затухания // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1977. Вып. 9. С. 115–117.

Дата поступления
в редакцию 15.07.2013

V.A. Bagilov, E.A. Mihalitsyn

THE FINE ADJUSTMENT OF FIXED ATTENUATORS WITH A LOW ATTENUATION LEVEL

Federal research and production center
«Measuring system research institute n. a. Yu.Ye. Sedakov»

The paper deals with the inhomogeneous thin resistive film structure placed on the top side of a metalized substrate. The problem of the laser trimming effect on the attenuator frequency bandwidth is concerned here. A theoretical framework is proposed based on the partial region method. This routine method seems suitable to calculate distributed structure equivalent resistances which could be than measured and controlled. As a result, the aimed resistance values and the required tolerance, which ensures the appropriate direct current attenuation, are obtained. The proposed numerical model in the paper does not account for the laser beam size, which is much smaller than the dimensions of the resistive film. The present study provides an assuming of frequency bandwidth for laser trimmed attenuators with different values of a surface resistance. The chief aim of this comprehensive investigation is to estimate the parasitic grounded capacity influence to the attenuator operating characteristics.

Key words: fixed attenuators, thin resistive films, laser adjustment.